

张卡, 刘丙军, 胡仕焜, 曾慧, 张明珠, 李丹. 2024. 珠江河口区复合洪水事件多要素非一致性的时变遭遇分析. 热带地理, 44 (1): 143-151.

Zhang Ka, Liu Bingjun, Hu Shikun, Zeng Hui, Zhang Mingzhu, and Li Dan. 2024. Multi-Element Non-Coherent Time-Varying Encounter Analysis of Complex Hazards Contributing to Pearl River Estuary Flooding. *Tropical Geography*, 44 (1): 143-151.

珠江河口区复合洪水事件多要素 非一致性的时变遭遇分析

张卡¹, 刘丙军^{1,2}, 胡仕焜¹, 曾慧³, 张明珠³, 李丹³

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519085; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广州 510275;

3. 广州市水务科学研究院有限公司, 广州 510220)

摘要: 利用1988—2017年珠江河口三灶站潮位、澳门风速、上游流量日极值数据, 基于广义可加模型(GAMLSS)的非一致性频率计算方法与时变Copula函数, 对上游洪水、台风和天文潮的复合洪水事件重现期及其主控因子展开研究, 结果表明: 1) 珠江河口区潮位、风速、流量均为非一致性序列, 构建的时变Copula模型相比传统恒定参数的Copula更符合实际情况。2) 1988—2017年珠江河口区典型复合洪水事件发生周期随时间不断缩短, 发生概率增大, 未来极端复合洪水事件发生概率增强。“黑格比”台风引发的复合洪水事件重现期从1988年的13.06 a一遇减小到2017年的10.80 a一遇, “韦森特”“天兔”引发的复合洪水事件在1988—2017年重现期缩短了1.06和0.97 a; 3) 当3种因子重现期为5 a一遇时, 珠江河口区复合洪水事件主要受台风风速影响较大; 重现期为10、20、50 a一遇时, 复合洪水事件主要受天文潮潮位影响较大。

关键词: 复合洪水事件; 遭遇分析; Copula函数; GAMLSS模型; 珠江河口

中图分类号: P333.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2024)01-0143-09

DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003813

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



近年来, 中国南海沿岸极端台风发生的频率与强度逐年增大, 上游洪水、台风和天文潮叠加引起的复合洪水事件问题日趋严重, 严重威胁三角洲地区人民的生命财产安全(罗志发等, 2022)。上游洪水、台风和天文潮的时空分布不均, 引发的潮位增水, 洪水、狂风等事件组合存在高度不确定性。针对自然事件的风险特征, 开展上游洪水、台风和天文潮复合事件的主控因子诊断及其和多要素遭遇分析, 对河口地区防范复合洪水事件有重大的现实意义。

复合洪水事件多要素遭遇分析是研究复合洪水事件规律的重要手段之一, 利用Copula函数连接多个变量边缘分布构建联合分布函数的水文统计方法, 既能通过筛选不同的连接函数体现随机变量之间关联性, 又能通过构造多变量不同的边缘分布

(关帅等, 2015), 使得每种边缘分布函数保留自己分布的特点, 反映单个随机变量分布特征。Copula函数可以反映水文事件随机性、相依性的特点, 近年来被广泛应用到水文要素的频率分析(赵铁松等, 2020)。目前, 国内基于上海地区降水、风速、潮位、雨量的年极值时间序列, 探讨了“雨洪风”“雨洪潮”和“雨风潮”3种致灾因子碰头情况下的联合分布函数, 并进行了组合风险分析(贺芳芳等, 2021)。高月娇等(2023)构建降水广义可加模型的二维Copula模型分析得出, 1982—2015年黄土高原地区旱涝复合事件极端情景显著上升, 且复合事件动态变化的主导因子为北极涛动指数和太阳黑子指数; 侯静惟等(2019)构建了热带气旋灾害的主要致灾因子大风和降水之间的二元Copula函数, 研究了不同Copula的联合重现期的相关性。许

收稿日期: 2022-11-10; **修回日期:** 2023-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52179029、51879289); 广东省水利科技创新项目(2023-01)

作者简介: 张卡(1999—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事台风危险性分析, (E-mail) zhangk296@mail2.sysu.edu.cn;

通信作者: 刘丙军(1976—), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士, 主要从事水资源系统分析研究, (E-mail) liubj@mail.sysu.edu.cn。

瀚卿等 (2022) 通过构建上海极端降水和极值水位两变量的联合分布函数, 评估不同联合重现期下降水和潮汐增水组合的复合洪涝风险。Bevacqua 等 (2019) 利用 Copula 结构研究发现, 意大利拉文纳 2015 年 2 月的复合洪水是通过一个低压系统在多个河流集水区产生台风、天文潮和强降水形成的。Ohlwein 和 Friederichs (2008) 基于 Copula 的方法运用多元关联分析工具箱 (MvCAT)、Vine Copula 中 C 藤和 D 藤、贝叶斯概率等方法, 扩展了多元模型的数量。Olbert 等 (2023) 以爱尔兰南海岸的科克市为例, 将统计和流体动力学模型联系起来, 利用 Copula 函数确定浪涌、沿海水位、河流流量关系的联合概率, 提高了 MSN_Flood 模型模拟不同洪水情景下洪水传播情况的精度。Yang 和 Qian 等 (2019) 提出了一种有效的粒子群优化 (PSO) 估计风速、极端水位、降水边际累积分布和 Copula 函数的参数, 该方法计算 Copula 条件联合分布误差较小。目前利用二元 Copula 函数对复合事件进行遭遇分析的方法成熟且研究广泛, 这些研究表明极端复合事件发生概率正显著上升, 复合事件中主要致灾因子的影响程度不同。受气候变暖的影响, 复合事件中各个致灾因子并非呈现出一致性, 且复合事件的发生受多种致灾因子影响, 二元 Copula 函数方法应用受限, 未来仍需深入研究多元 Copula 函数技术以及复合事件中非一致性水文资料的遭遇分析。

当前对沿海地区复合洪水事件遭遇分析的研究大多以水文因子一致性假设为基础, 要求水文序列的统计特征不随时间改变。珠江河口河网纵横交错, 天文大潮、台风等极端气候背景和人类活动双驱动作用下, 会导致对洪水概率分布描述的偏差 (顾西辉等, 2014)。传统以固定 Copula 参数分布的研究方法, 忽略了各个水文序列的非一致性, 会导致复合洪水事件遭遇等级有所偏差。因此, 本研究以珠江河口为研究对象, 在传统复合洪水事件联合分布风险评估框架内, 进一步考虑潮位、风速、流量 3 种因子潜在的非一致性, 并利用 GAMLSS 模型 (Durocher et al., 2015) 和 Copula 似然比方法 (Huang et al., 2017) 构建三变量联合时变分布

函数, 分析不同等级复合洪水事件的时变特征和遭遇规律。以期为珠江河口复合洪水事件防御提供理论与技术支撑。

1 研究区概况与数据

珠江河口位于广东省中南部、珠江下游, 该地区总面积为 5.54 万 km^2 , 珠江干流全长 2 214 km, 主要由西江、北江和东江汇合而成。水道纵横交错形成密集的河网流经虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡鸣门、虎跳门和崖口八大口门汇入南海。这些密集的河网携带的泥沙在珠江口河口湾内堆积形成了包括惠州市、东莞市、广州市、佛山市、江门市、中山市、深圳市、珠海市、肇庆市九大城市的珠江三角洲 (图 1)。珠江入海的水量约为 3 742 亿 m^3 , 其中, 西江是珠江的主干流, 西江、北江的中下游干流水道主要从珠江的磨刀门入海, 三水站和马口站分别位于北江和西江中下游干流处, 可代表珠江上游总径流量, 而澳门站和三灶站位于珠江河口, 能较好的代表珠江河口地区受台风影响时的潮位和风速。每年汛期西北太平洋海面发生的台风大多在珠江河口地区登陆, 若同时和天文潮、上游洪水叠加往往会造成严重的水位抬升, 导致漫滩漫堤, 造成重大的生命财产损失 (李阔等, 2010)。2018-09-07 “山竹” 台风在西太平洋海面生成, 9 月 16 日在中国广东省台山市海晏镇登陆, 引发珠江河口测站最大增水达 3.37 m, 造成广东省 5 人死亡, 约 252 万人紧急避险转移和安置, 600 余

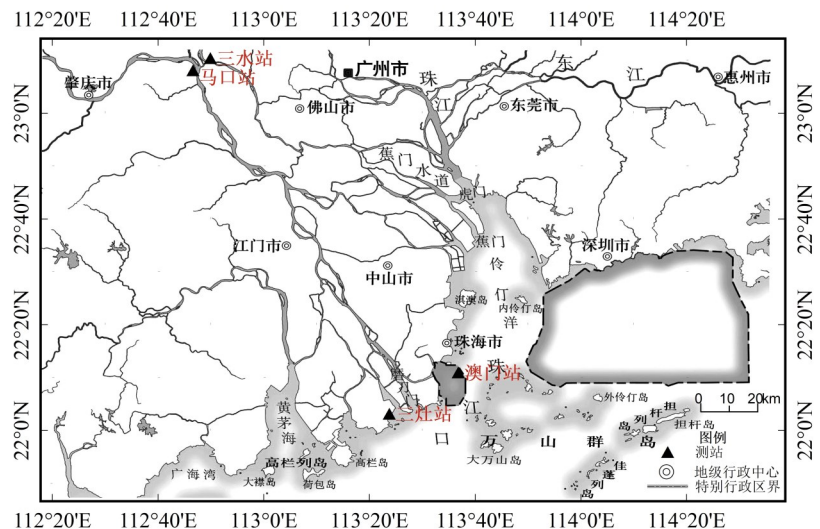


图 1 研究区域示意

Fig.1 Schematic diagram of study area

间房屋损毁, 103.5 km²农作物受灾, 直接经济损失 32.1 亿元 (刘士诚 等, 2021)。粤港澳大湾区位于珠江河口地区, 地理位置特殊, 经济发达, 受上游洪水、台风和天文潮复合洪水事件影响巨大。

基于珠江河口地带 1988—2017 年共 30 a 的三灶站每日最大潮位、澳门气象站每日平均风速, 采用年最大值法筛选三灶站日极值潮位, 并找到该天文潮事件对应的日最大风速、日最大流量。其中, 极值潮位表征珠江河口地区复合洪水事件的天文潮量级, 三水和马口两站每日总流量代表复合洪水事件的洪水洪峰量, 澳门日最大风速表征复合洪水事件的台风量级构建三要素时变联合分布函数, 分析珠江河口 3 种因子时变特征及其遭遇规律。

2 研究方法

2.1 GAMLSS 函数

以时变矩法的内容作为基本思路, Rigby 等 (2005) 提出水文序列中位置、尺度和形状的广义可加模型 (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape, GAMLSS), 用于模拟不同水文序列的时变参数边缘分布。模型定义研究变量 Y 的 n 个独立观测值 y_i 服从概率分布 $f(y_i|\theta_i)$, 其中 $\theta_i = (\theta_1^i, \theta_2^i, \theta_3^i, \theta_4^i) = (\mu_i, \sigma_i, \nu_i, \tau_i)$ 为概率分布参数组成的向量, μ_i 和 σ_i 对应为变量 Y 的均值向量以及变差系数向量, ν_i 和 τ_i 定义为偏度和峰度参数。利用连接函数 $g_k(\theta_k)$ 建立概率分布参数和解释变量之间的联系, 连接函数的一般表达式为 (Rigby et al., 2005):

$$g_k(\theta_k) = \eta_k = X_k \beta_k + \sum_{j=1}^{j_k} Z_{jk} \tau_{\mu} \quad (1)$$

式中: $g_k(\theta_k)$ 代表 n 个时段的解释变量 X_k 对已知设计矩阵 $Z_{jk} \tau_{\mu}$ 的连接函数, $k = 1, 2, 3, 4$; β_k 为待求解的参数向量; Z_{jk} 为已知的设计矩阵; τ_{μ} 是由随机变量组成的列向量, 选取不同的概率分布曲线和概率分布参数可以构建多个 GAMLSS 模型, 本文 GAMLSS 模型主要基于 R 语言中的 GAMLSS 包, 通过其中可选择的伽马分布 (Gamma, GA)、耿贝尔分布 (Gumbel, GU)、逻辑斯谛分布 (Logistic, LO)、正态分布 (Normal, NO)、韦伯分布 (Weibull, WEI)、广义帕累托分布 (Generalized pareto, GP) 等选取最优时变边缘分布曲线。

2.2 时变 Copula 函数

不同类型 Copula 函数与参数分别代表多个变量

耦合的形状以及耦合强度。基于 Copula 函数的似然比方法 (Copula-based likelihood-ratio test, CLR test) 可以检验不同变量耦合强度 (Huang et al., 2017)。假设 Copula 函数的类型不变, 检测 Copula 函数的参数是否发生变化, 其原理为: 已知 y_i 是序列观测值, 且服从概率分布函数 $F(y_i|\theta_{c,n})$, 其中 $\theta_{c,n}$ 为不同时段 Copula 函数的参数, H_0 假设 Copula 函数不同时段参数不发生变化。

构造与 Copula 函数参数有关的似然比 X_k , 当 X_k 较小时, 拒绝原假设 H_0 , 两者拟合而成的 Copula 函数存在变点 K , 似然比 X_k 与 Copula 函数参数 $\theta_{c,0}$, $\theta_{c,1}$, $\theta_{c,2}$ 极大似然值的解析式为 (方伟, 2020):

$$X_k = \frac{L_n(\eta_0)}{L_k(\eta_1)L_{n-k}(\eta_2)} = \frac{\prod_{i=1}^n c(u_i|\eta_0)}{\prod_{i=1}^k c(u_i|\eta_1) \prod_{i=k+1}^n c(u_i|\eta_2)} \quad (2)$$

式中: $L_n()$ 为数据数量为 n 的水文序列似然函数; $L_k()$ 和 $L_{n-k}()$ 为 Copula 突变点前后的似然函数; $c()$ 为 Copula 函数的概率密度函数; η_0 , η_1 , η_2 为 Copula 函数参数 $\theta_{c,0}$, $\theta_{c,1}$, $\theta_{c,2}$ 的极大似然估计值。

若 X_k 的对数统计检验值 Z_n 概率值 $< 5\%$, 表明在 5% 显著性水平下拒绝原假设, 即该变量的 Copula 关系存在突变点, 其突变点位于 (方伟, 2020):

$$k = \arg \max_{1 \leq i \leq n} -2 \ln X_k \quad (3)$$

若 Copula 函数存在突变则其参数 θ_k 为时变参数。当 Copula 参数随时间发生变化时, 引入年份 t 作为解释变量, 其解析式为 (方伟, 2020):

$$g(\theta) = \beta_0 + \beta_1 t \quad (4)$$

采用边际函数推断法 (Inference function for Marginal method, IFM), 通过最大化对数似然公式求 Copula 参数 θ 的表达式 (方伟, 2020)。

$$L(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \sum_{j=1}^n \ln [c(u_1, u_2|\theta_3)] + \sum_{i=1}^n \ln [f_1(u_1|\theta_1)] + \sum_{i=1}^n \ln [f_2(u_2|\theta_2)] \quad (5)$$

式中: c 为 Copula 的概率密度函数; f_1 、 f_2 分别代表潮位、风速的已知边缘分布函数, 将等号右侧第一项最大化即可得到 Copula 时变参数的最优 β_0 和 β_1 。

Joe (1993) 引入嵌套阿基米德 Copula 即分层 Copula, 来改善不同变量的相关性。本文应用完全嵌套 Copula 函数 (陈冲, 2020), 将潮位、风速二变量时变 Copula 函数与和时变流量边缘分布函数进行拟合, 构建时变三变量联合分布函数, 其表达式

为(张野等, 2017):

$$C(u_1, u_2, u_3) = C_{21}[C_{11}(u_1, u_2), u_3] = \varphi_{21}^{-1}\{\varphi_{21}(u_3) + \varphi_{11}^{-1}[\varphi_{11}(u_1) + \varphi_{11}(u_2)]\} \quad (6)$$

式中: u_n 指不同变量的边缘分布函数; C 表示不同的 Copula 连接函数。

3 结果分析

3.1 时变联合分布函数优选

根据单位根检验 (Augmented Dickey-Fuller test) 得到潮位、风速、流量时间序列均为非一致性序列, 选用 GAMLSS 模型估计 3 组水文时间序列的时变统计参数, 利用贝叶斯信息度量 (Bayesian information criterion) BIC 值, 判断不同边缘分布曲线的拟合程度, 如表 1 所示。BIC 值最小的 Normal 分布、Gamma 分布和 Weibull 分布的拟合程度越高,

它们分别为潮位、风速、流量拟合的最优边缘分布函数。图 2 显示: 拟合后的边缘分布函数偏差点均位于 95% 置信区间 (虚线) 内, 且均靠近偏值为 0 的黑色虚线周围, 即 3 种变量非一致性边缘分布函数拟合效果较好, 拟合后的边缘分布函数各年份偏差值较小, 拟合误差小, 精度高, 能较好地模拟不同水文序列概率密度的时变特征。

表 1 GAMLSS 模型拟合的潮位、风速、流量 BIC 值

Table 1 Tide level, wind speed and flow BIC values fitted by

GAMLSS model

项目	Exponential	Gamma	Normal	Lognormal	Logistics	Weibull
潮位	9.99	2.48	1.59	11.53	8.47	6.54
风速	291.59	283.27	300	297.29	307.12	295.74
流量	579.93	584.11	588.33	598.13	578.54	543.72

注: Normal 分布、Gamma 分布和 Weibull 分布分别为潮位、风速、流量拟合的最优边缘分布函数。

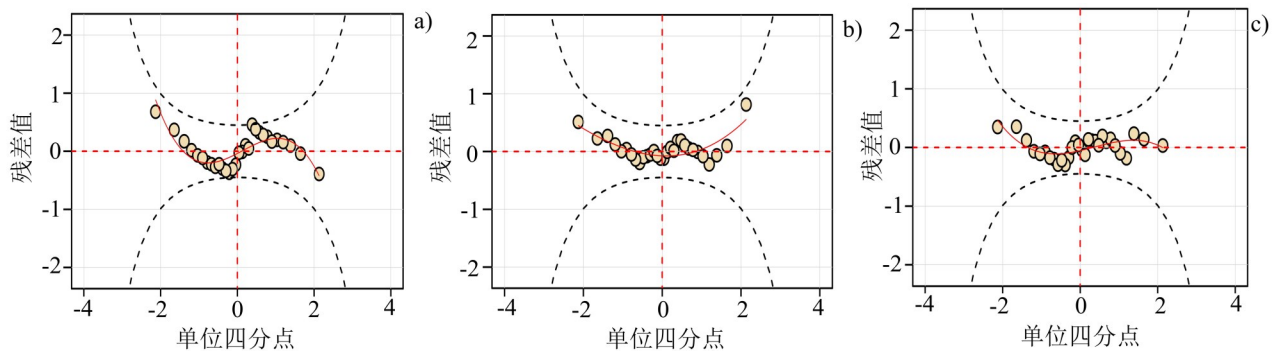


图 2 基于 Worm plot 的潮位 (a)、风速 (b)、流量 (c) 拟合优度检验

Fig.2 Tide(a), wind speed(b) and flow(c) fitting effect test based on Worm Plot

潮位和风速的相依关系呈现非一致性特征, 利用 Copula 似然比方法进行拟合。选取 BIC 最小的 Frank Copula 函数作为最优的 Copula 函数。优选的 Frank Copula 函数参数 θ 和时间的函数关系为 $\ln(\theta - 1) = 0.84 - 0.54t$ (其中 t 为时间年份与初始时间 1988 年之间的差值), 构建时变参数的潮位-风速时变 Copula 参数 (图 3)。在潮位-风速时变 Copula 参数图中, 当潮位、风速耦合结构呈现非一致性关系时, 选取的最优 Copula 的参数随时间不断减小, 由于 Copula 函数类型均为 Frank Copula, 潮位和风速相依结构的形状不变, 两者尾部相关性不强。选取不同年份的潮位-风速联合分布函数, 与时变最优流量边缘分布函数构建第三层 Copula 函数, 通过嵌套结构获得 1990、1999、2017 年的三变量联合分布

函数 (图 4), 可知, 随着时间变化 3 种变量耦合后的联合分布的概率有小幅增大。

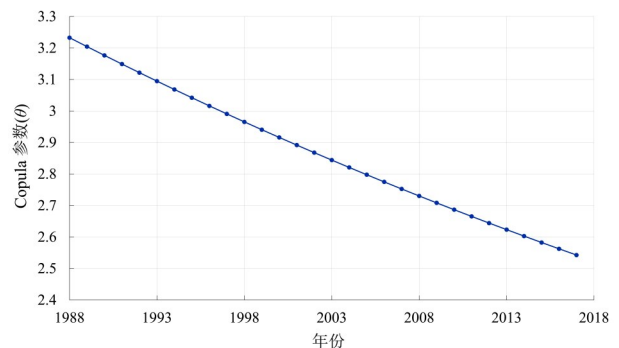


图 3 潮位-风速时变 Copula 参数

Fig.3 Time-varying Copula parameter diagram of combined tidal level and wind speed

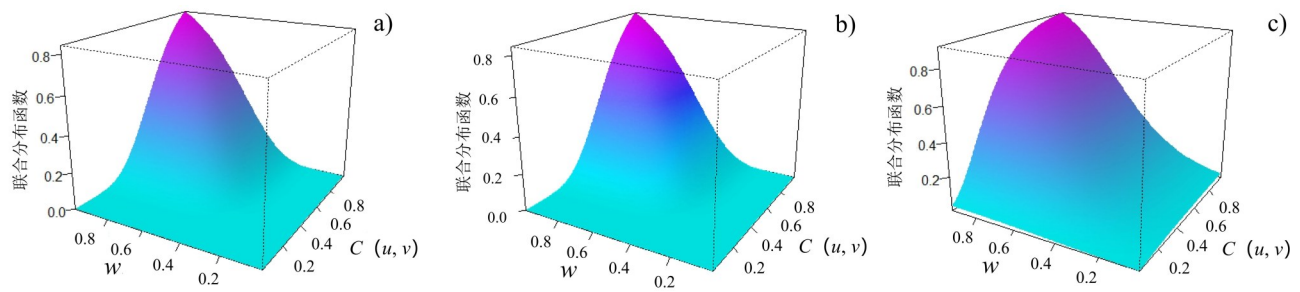
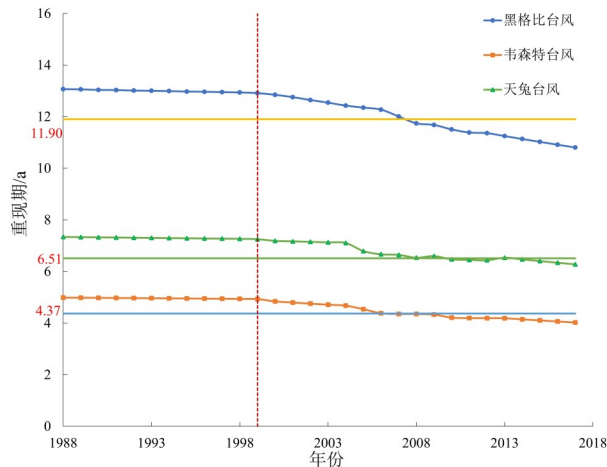


图4 各年三变量联合分布函数 (a. 1990年, $\theta=3.17$; b. 1999年, $\theta=2.94$; c. 2017年, $\theta=2.54$)

Fig.4 Three-variable joint distribution function in 1990(a. $\theta=3.17$), 1999(b. $\theta=2.94$), 2017(c. $\theta=2.54$)

3.2 不同等级台风重现期时变分析

利用非线性 Copula 函数, 分析 2008-09-19—26 “黑格比”、2012-07-21—24 “韦森特”与 2013-09-18—22 “天兔” 3 场不同等级复合洪水事件在 1988—2017 年不同年份时变联合重现期, 利用三场等级复合洪水事件的潮位、流量、风速极值计算时变联合重现期, 结果如图 5 所示, 通过分析得出如下几点认识:



图注: 虚线为不同等级复合洪水事件 1988—2017 年重现期的平均值, 各点为不同等级复合事件在不同年份的重现期情况。

图5 不同台风事件时变联合重现期

Fig.5 Combined return periods of different storm surge events

1) 时变联合分布函数能更好地体现水文序列的非稳定性和时变特征, 能较好地反映随时间变化下各等级台风危险性的变化。假设水文序列为平稳序列, 利用传统的边缘分布函数和传统恒定 Copula 参数可以计算得到 “黑格比” “韦森特” “天兔” 复合洪水事件的恒定参数联合重现期分别为 11.9、4.37、6.51 a。但利用 Copula 似然比方法计算的时

变情况下 1988—2017 年 “黑格比” 复合洪水事件平均约为 12.28 a 一遇, 2008 年 “黑格比” 复合洪水事件的重现期为 11.74 a, 比传统恒定 Copula 参数计算的联合重现期小; 利用恒定参数的联合分布函数求得的 “韦森特” 事件 “天兔” 事件的重现期分别为 4.37 和 6.51 a, 比复合洪水事件发生年份的时变联合分布函数的重现期 4.19 和 6.53 a 长, 且 3 场复合洪水事件重现期随时间变化不断缩小, 利用时变联合分布函数比传统恒定 Copula 参数方法计算的 3 场典型复合事件的重现期更长, 即复合洪水事件等级较强, 利用时变联合分布函数比传统恒定 Copula 参数计算的重现期更符合实际。

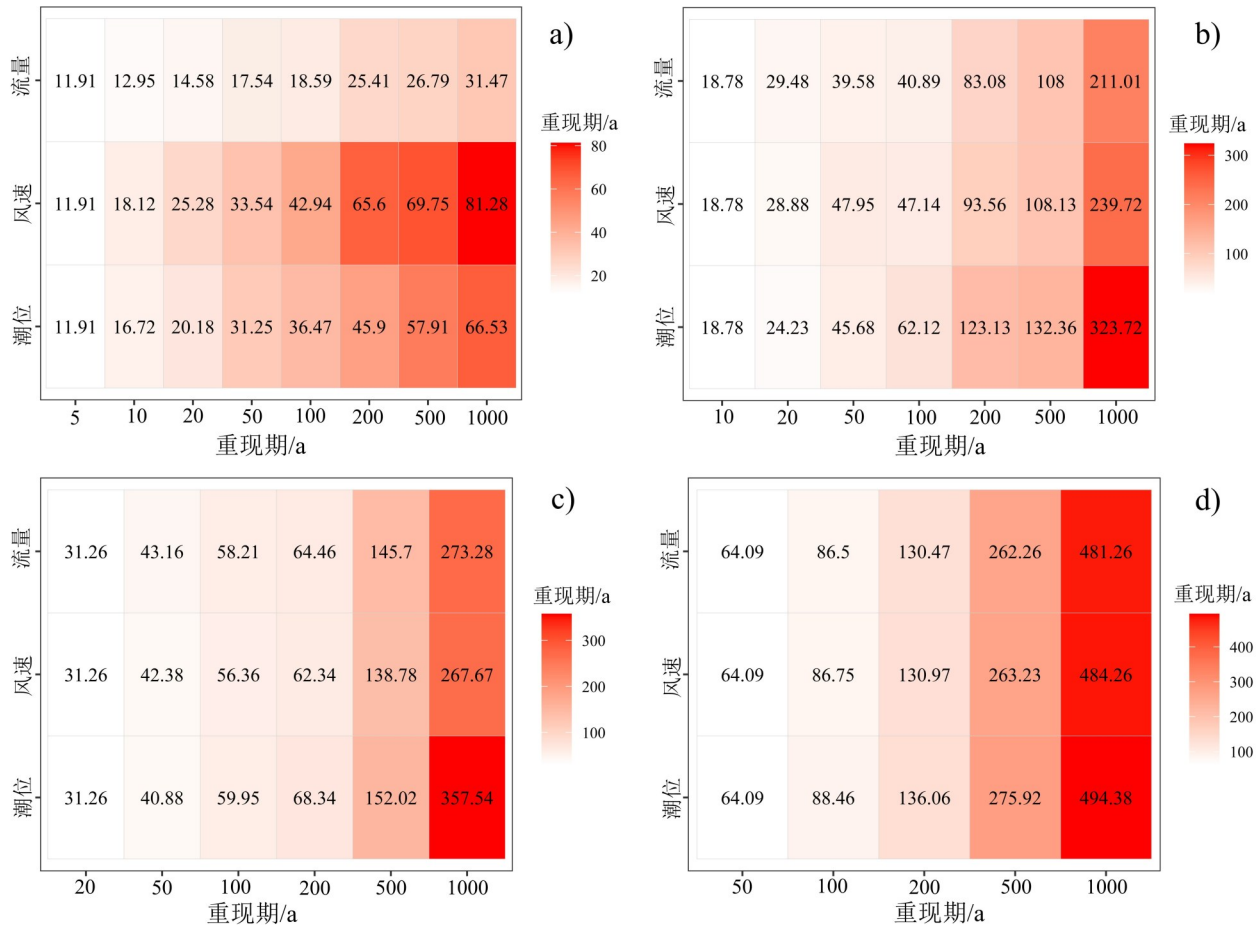
2) 在变化环境下, 随着时间推移, 不同等级复合洪水事件联合重现期不断缩短, 发生的频率不断增大, 且等级较大的复合洪水事件重现期减小的趋势更快, 说明未来相同复合事件发生频率将会不断增加, 同一场复合洪水事件在未来发生的危险性增强。1999 年发生 “黑格比” 等级复合洪水事件的重现期约为 13.06 a, 2017 年该等级复合洪水事件的重现期为 10.80 a, 且在 1999—2004 年其复合洪水事件重现期缩短较快, 表明该等级复合洪水事件未来发生的频率在增大, 未来大约每 12 a 将可能出现一场该等级的复合洪水事件。 “黑格比” “韦森特” “天兔” 3 场复合洪水事件重现期在 1988—2017 年的变化特征一致, 在 1988—2017 年 “黑格比” “韦森特” “天兔” 复合洪水事件的重现期均缩短了 2.26、1.06、0.97 a, 整体上, 等级越高的复合洪水事件缩短的趋势越快, 则未来相同等级的复合洪水事件重现期将会缩短, 发生的概率将会增大。

3.3 复合洪水事件主控因子分析

基于珠江河口潮位、风速、流量的非平稳性变化特点与复合洪水事件遭遇组合, 利用敏感性分析方法, 探讨该河口区不同重现期基准下上游洪

水、台风和天文潮复合洪水事件的主控因子,若潮位、风速、流量单变量重现期均为5、10、20、50 a一遇时,控制潮位、风速、流量中2种水文变量重现期不变,将某一因子的重现期提高到10、

20、50、100、200、500、1 000 a一遇,计算该灾因子重现期提高后的2013年复合洪水事件的同现重现期(图6),通过分析4幅热力图得出如下几点认识:



图注: 横坐标表示单一变量改变后的重现期, 而热力图中数值则表示单一变量重现期改变后的三变量同现重现期。

图6 以5、10、20、50 a为基准单变量不同频率下三变量同现重现期

Fig.6 The recurrence period of three variables with one variable and different frequencies by 5, 10, 20, 50 a

1) 当以5 a为基准重现期时, 复合洪水事件主要受台风影响较大; 以10、20、50 a为基准重现期时, 重现期逐渐增大, 复合洪水事件主要受天文潮影响较大。整体上天文潮对复合洪水事件的影响程度最大。潮位和流量2种因子的重现期不变均为5 a一遇时, 降低风速因子发生频率, 使其风速单变量重现期增长, 则复合洪水事件危险性变化最强。风速重现期从5 a一遇增大到100 a一遇时, 复合洪水事件的同现重现期从11.91 a一遇增大到42.94 a一遇, 其增大幅度为260.54%, 表明复合洪水事件对天文潮的敏感程度更高。当潮位的重现期从5 a一

遇提高到100 a一遇时, 复合洪水事件同现重现期从11.91 a一遇变为36.47 a一遇, 整体变化幅度为206.21%; 但随着上游流量的发生频率减小, 流量重现期增大, 复合洪水事件同现重现期的变化程度较小, 当潮位和风速为5 a一遇, 流量为100 a一遇时, 复合洪水事件的同现重现期仅为18.59 a一遇, 整体变化幅度为56.09%。当以10、20、50 a为基准重现期时, 潮位重现期改变为1 000 a一遇时, 三变量同现重现期为323.72、357.54、494.38 a, 比流量和风速改变导致的同现重现期更长, 表明复合洪水事件对天文潮更为敏感, 更容易受其影响。

2) 重现期基准改变时其同现重现期改变幅度也有所不同, 当重现期基准为 5 a 时, 风速从 5 a 一遇改变为 1 000 a 一遇时, 同现重现期从 11.91 a 增长到 81.28 a, 重现期增长了 69.37 a; 重现期基准为 50 a 时, 随着潮位这一单变量重现期增长, 同现重现期增长到 420.17 a, 增长幅度最大。因此当 3 种因子的基准较大时, 某一变量重现期改变, 三变量同现重现期变化幅度最大。

4 结论

基于珠江河口 1988—2017 年三灶站潮位、澳门气象站风速、三水和马口流量的逐日极值数据, 利用 GAMLSS 模型和时变 Copula 函数构建了复合洪水事件发生时 3 种因子的时变联合分布函数, 分析了变化环境下上游洪水、台风和天文潮 3 种事件的遭遇分析以及该复合事件的主控因子, 得到以下主要结论:

1) 复合洪水事件中潮位、风速、流量水文序列呈现非平稳特征, 且互相之间有一定的相依关系, 因此, 在进行复合洪水事件遭遇评估时, 需考虑 3 种因子的非平稳性特征。本文所构建的时变联合分布函数能较好地反映 3 种水文序列的非平稳特征, 对研究复合洪水事件多要素的遭遇特征适用程度更高, 更符合实际情况。

2) 与传统恒定 Copula 参数的联合重现期相比, 非线性时变联合分布函数计算的 3 次典型复合洪水事件的重现期随时间推移不断减小, 表明该等级复合洪水事件发生概率不断增大, 未来该等级复合洪水事件的周期性会不断缩小, 重现期将缩短, 即未来复合洪水事件将增多。且等级越高的复合洪水事件重现期缩短的趋势越快。如“黑格比”台风引起的复合洪水事件在 1988—2017 年的联合重现期随着时间演变呈现不断减小的趋势, 从 13.06 a 一遇, 减小至 10.80 a 一遇, 未来大约每 12 a 将可能出现一场该等级的复合洪水事件。

3) 当 3 种因子重现期较小时, 复合洪水事件主要受台风影响较大; 重现期逐渐增大, 复合洪水事件主要受天文潮影响较大。当其余 2 种致灾因子均为 5 a 一遇时, 随着风速和潮位的发生等级增长到 100 a 一遇, 其同现重现期增长到 42.94 和 36.47 a 一遇, 增长了 31.03 和 21.56a, 流量所引起的联合重现期的增幅仅为 56.09%, 即天文潮和台风对上游洪水、台风和天文潮的复合洪水事件规模的影响程度较大, 上游洪水的影响作用相对偏小。当以 10、

20、50 a 为基准重现期时, 随着潮位重现期改变为 1 000 a 一遇, 三变量同现重现期增长幅度最大, 复合洪水事件更容易受天文潮影响。

参考文献 (References):

- Agnieszka I Olbert, Sogol Moradian, Stephen Nash, Joanne Comer, Bartosz Kazmierczak, Roger A Falconer, and Michael Hartnett. 2023. Combined Statistical and Hydrodynamic Modelling of Compound Flooding in Coastal Areas- Methodology and Application. *Journal of Hydrology*, 620(A): 129383.
- Bevacqua Emanuele, Maraun Douglas, Voudoukas Michalis Ioannis, Voukouvalas, Evangelos, Vrac Mathieu, Mentaschi Lorenzo, and Widmann Martin. 2019. Higher Probability of Compound Flooding from Precipitation and Storm Surge in Europe under Anthropogenic Climate Change. *Science Advances*, 5(9): eaaw5531.
- 陈冲. 2020. 基于嵌套 Copula 函数的多预见期径流预报误差相依结构模型. 北京: 华北电力大学. [Chen Chong. 2020. *Dependent Structure Model for Runoff Forecasting Errors in Multiple Forecast Periods Based on Nested Copula Function*. Beijing: North China Electric Power University.]
- Durocher Martin, Chebana Fateh, and Ouarda Taha. 2015. On the Prediction of Extreme Flood Quantiles at Ungauged Locations with Spatial Copula. *Journal of Hydrology*, 533: 523-532.
- 方伟. 2020. 多变量视角下珠江流域旱涝灾害时变风险研究. 西安: 西安理工大学. [Fang Wei. 2020. *Assessing Time-Varying Risk of Drought and Flood from a Multivariate Perspective in the Pearl River Basin, China*. Xi'an: Xi'an University of Technology.]
- 高月娇, 黄生志, 王韩叶, 王志霞, 郭雯雯, 穆振侠, 陈刚, 黄强. 2023. 考虑非一致性的黄土高原区旱涝复合事件的演变特征及其动态变化. *农业工程学报*, 39 (8): 133-143. [Gao Yuejiao, Huang Shengzhi, Wang Hanyue, Wang Zhixia, Guo Wenwen, Mu Zhenxia, Chen Gang, and Huang Qiang. 2023. Evolution Characteristics and Dynamic Changes of Drought-Flood Complex Events on Loess Plateau in Terms of Non-Consistency. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 39(8): 133-143.]
- 顾西辉, 张强, 刘剑宇, 张正浩. 2014. 变化环境下珠江流域洪水频率变化特征、成因及影响 (1951—2010 年). *湖泊科学*, 26 (5): 661-670. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Liu Jianyu, and Zhang Zhenghao. 2014. Characteristics Causes and Impacts of the Changes of the Flood Frequency in the Pearl River Drainage Basin from 1951 to 2010. *Journal of Lake Sciences*, 26(5): 661-670.]
- 关帅, 查悉妮, 丁波, 林颖妍, 卓文珊, 刘祖发. 2015. 基于 Copula 函数的珠江流域河川径流丰枯遭遇. *热带地理*, 35 (2): 208-217. [Guan Shuai, Zha Xini, Ding Bo, Lin Yingyan,

- Zhuo Wenshan, and Liu Zufa. 2015. Wetness-Dryness Encountering of Runoff of the Pearl River Basin Based on Copula Functions. *Tropical Geography*, 35(2): 208-217.]
- 贺芳芳, 梁卓然, 董广涛. 2021. 上海地区洪涝致灾因子复合概率及未来变化分析. 灾害学, 36 (2): 9-13, 18. [He Fangfang, Liang Zhuoran, and Dong Guangtao. 2021. Analysis on the Compound Probability and Future Change of Flood and Waterlogging Disaster Factors in Shanghai. *Journal of Catastrophology*, 36(2): 9-13, 18.]
- 侯静惟, 方伟华, 程锰, 叶妍婷, 吴鹏, 韩轶男. 2019. 基于 Copula 函数的海南热带气旋风雨联合概率特征分析. 自然灾害学报, 28 (3): 54-64. [Hou Jingwei, Fang Weihua, Cheng Meng, Ye Yanting, Wu Peng, and Han Yinan. 2019. Joint Probability Analysis of Tropical Cyclone Wind and Rainfall for Integrated Hazard Severity Assessment in Hainan. *Journal of Natural Hazards*, 28(3): 54-64.]
- Huang Shengzhi, Li Peihuang, Qiang Leng, and Leng Guoyong. 2017. Copula-Based Identification of the Non-Stationarity of the Relation Between Runoff and Sediment Load. *International Journal of Sediment Research*, 32(2): 221-230.
- Joe H. 1993. Parametric Families of Multivariate Distributions with Given Margins. *Journal of Multivariate Analysis*, 46: 262-282.
- 李阔, 李国胜. 2010. 珠江三角洲地区风暴潮重现期及增水与环境要素的关系. 地理科学进展, 29 (4): 433-438. [Li Kuo and Li Guosheng. 2010. Calculation of Return Period for Storm Surge in the Pearl River Delta Region. *Progress in Geography*, 29(4): 433-438.]
- 刘士诚, 陈永平, 谭亚, 于茜倩, 马经广. 2021. 珠江河网 1822 号台风“山竹”期间风暴增水模拟及特性分析. 海洋预报, 38 (2): 12-20. [Liu Shicheng, Chen Yongping, Tan Ya, Yu Xiqian, and Ma Jingguang. 2021. Storm Surge Simulation and Characteristic Analysis during Typhoon “Mangkut” 2018 in the Pearl River Estuary. *Marine Forecast*, 38(2): 12-20.]
- 罗志发, 黄本胜, 邱静, 谭超, 黄广灵. 2022. 粤港澳大湾区风暴潮时空分布特征及影响因素. 水资源保护, 38 (3): 72-79, 153. [Luo Zhifa, Huang Bensheng, Qiu Jing, Tan Chao, and Huang Guangling. 2022. Spatio-Temporal Distribution Characteristics and Influencing Mechanisms of Storm Surge in Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area. *Water Resources Protection*, 38(3): 72-79, 153.]
- 许瀚卿, 谭金凯, 李梦雅, 王军. 2022. 基于 Copula 函数的沿海城市雨潮复合灾害风险研究. 自然灾害学报, 31 (1): 40-48. [Xu Hhanqing, Tan Jinkai, Li Mmengya, and Wang Jun. 2022. Compound Flood Risk of Rainfall and Storm Surge in Coastal Cities as Assessed by Copula Formal. *Journal of Natural Disasters*, 31(1): 40-48.]
- Ohlwein Christian and Friederichs Petra. 2008. Multivariate Non-Normally Distributed Random Variables in Climate Research - Introduction to the Copula Approach. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 15: 761-772.
- Rigby Bob, Mikis D Stasinopoulos, and Calliope Akantziliotou. 2005. Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 54: 507-554.
- Yang Xing and Qian Jun. 2019. Joint Occurrence Probability Analysis of Typhoon-Induced Storm Surges and Rainstorms Using Trivariate Archimedean Copulas. *Ocean Engineering*, 171: 533-539.
- 张野, 王康, 刘欣铭, 张苏辰, 周嘉, 王荣林. 2017. 基于 Copula 函数的暴雨要素三维联合分布——以宽甸县为例. 地理科学, 37 (4): 603-610. [Zhang Ye, Wang Kang, Liu Xinming, Zhang Suchen, Zhou Jia, and Wang Cailin. 2017. The Three-Dimensional Joint Distributions of Rainstorm Factors Based on Copula Function: A Case in Kuandian County, Liaoning Province. *Scientia Geographica Sinica*, 37(4): 603-610.]
- 赵铁松, 王丽荣, 郭恩亮, 张琪. 2020. 基于 Copula 函数的降水事件危险性评估——以子牙河流域典型区为例. 自然灾害学报, 29 (6): 199-208. [Zhao Tiesong, Wang Lirong, Guo Enliang, and Zhang Qi. 2020. Hazard Assessment of Precipitation Events Based on Copula Function: Take the Typical Area of Ziya River Basin as An Example. *Journal of Natural Disasters*, 29(6): 199-208.]

作者贡献声明:

- 张 卡**: 主要负责处理研究数据和绘图, 分析数据, 撰写及修订全文;
- 刘丙军**: 确定论文选题和研究思路, 把控论文的核心思想和总体质量;
- 胡仕焜**: 协助数据处理, 提出修改意见;
- 曾慧、李丹、张明珠**: 收集研究数据, 提供数据支撑;

Multi-Element Non-Coherent Time-Varying Encounter Analysis of Complex Hazards Contributing to Pearl River Estuary Flooding

Zhang Ka¹, Liu Bingjun^{1,2}, Hu Shikun¹, Zeng Hui³, Zhang Mingzhu³, and Li Dan³

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519085, China; 2. Research Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Guangzhou Water Science Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

Abstract: In conjunction with global warming, the frequency and intensity of typhoons in the Pearl River Estuary region are increasing annually, and coastal cities are becoming more vulnerable to compound disasters triggered by upstream flooding, typhoons, and astronomical tide surges, seriously threatening the lives and properties of people in the delta region. Quantitative analysis of the degree of variability of each factor associated with a compound flood event and accurate assessment of the magnitude of the compound flood event strongly impact the efficacy of coastal city responses aimed at disaster prevention and damage mitigation. In this study, focused on the Pearl River Estuary area, the tide levels at Sanzao station, wind speeds at Macao station, and daily maximum the maximum daily flow at Sanshui and Makou stations spanning 30 years from 1988 to 2017 were used to characterize the flood magnitude, typhoon magnitude, and astronomical tide magnitude of compound flood events in the Pearl River Estuary area. Data were screened using the annual maximum method. Based on the generalized additive model (GAMLSS) and the time-varying copula function, the encounter combinations of composite flood events of different levels and their main controlling factors were investigated. The results show that: 1) the main factors influencing initiation and magnitude of composite flood events in the Pearl River estuary area are non-consistent sequences that display interdependence. The time-varying copula model constructed in this study is more suitable for studies of composite floods than the traditional constant parameter copula model. Copula models are most applicable to studies of the encountered characteristics of multiple elements contributing to compound flood events and are most in line with actual situations. 2) Compared with the joint return period of traditional constant copula parameters, the period of occurrence of typical compound flood events in the Pearl River Estuary from 1988 to 2017 continuously shortens with time, the probability of occurrence increases, and the probability of future occurrence of extreme compound flood events is strengthening. The trend in which the return period of compound flood events is shortening with higher grades is accelerating. 3) Compound flood events throughout the Pearl River estuary area are more affected by typhoons and astronomical tides and less affected by water flow. When the return period of the three factors is one in 5 years, water flow causes the smallest increase in the co-occurrence return period; i.e., the influence of astronomical tide and typhoon on the scale of upstream flooding, composite flood events of typhoon, and astronomical tide is proportionately larger. Thus, composite flood events in the Pearl River estuary area are mainly impacted by typhoons with higher wind speeds. When the return period of the three factors is one in 10, 20, and 50 years, the increase in the co-occurrence return period caused by flow changes the most; and when the return period of the three factors is one in 10, 20, and 50 years, the acceleration of the co-occurrence return period caused by flow is the largest. When the three factors have a larger return period, astronomical tide exerts proportionately greater influence on the scale of the composite flood event of upstream flood, typhoon, and astronomical tide.

Keywords: flood complex hazard; encounter analysis; Copulas; the Generalized Additive Model(GAMLSS); Pearl River Estuary